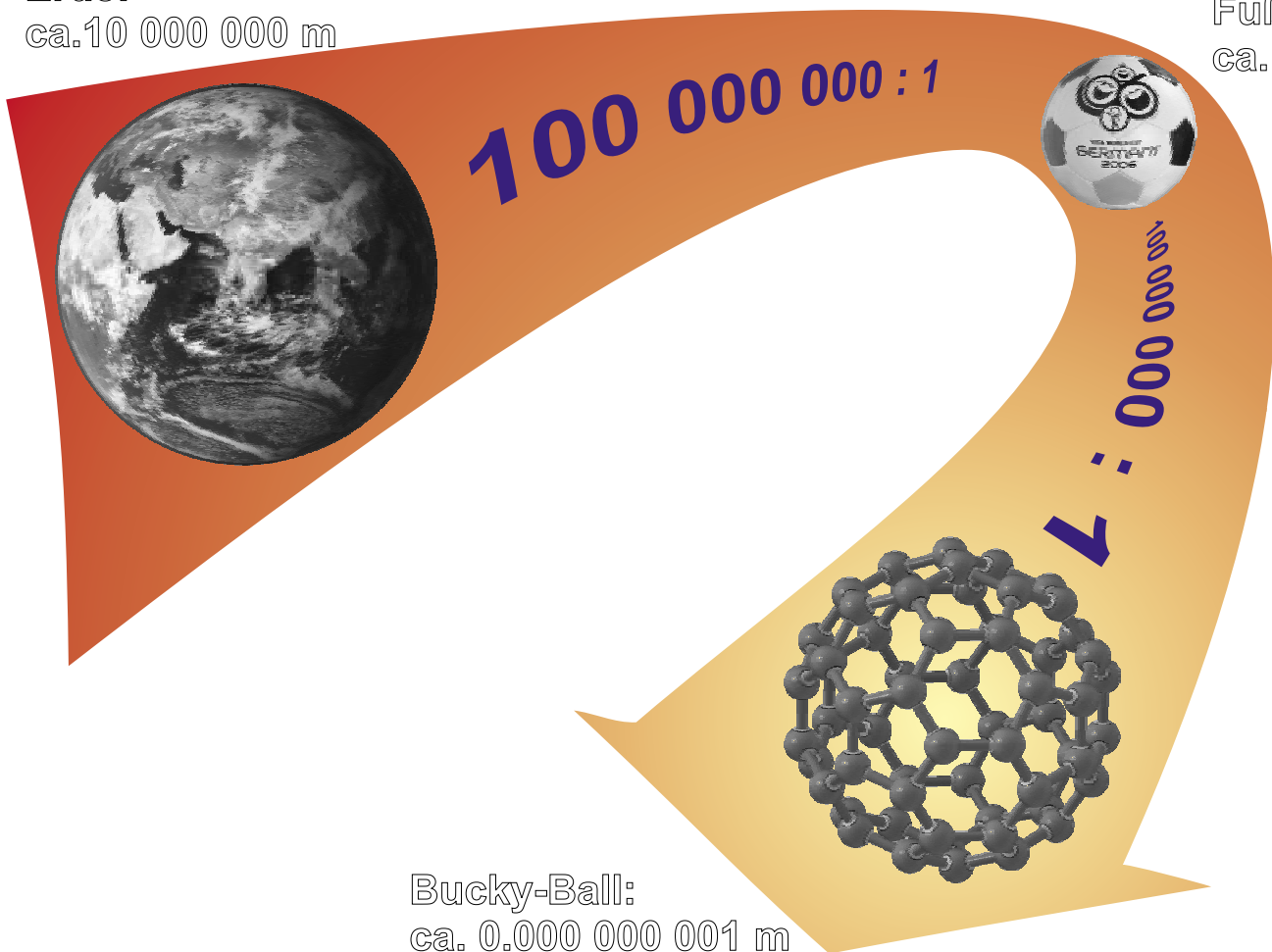


Erde:  
ca. 10 000 000 m

Fußball:  
ca. 0.1 m



## Nanofußbälle im Synchrotronstrahl

**Internationale Forschergruppe um Gießener Atomphysiker versetzt Elektronen in  $C_{60}$ -Molekülen in exotische kollektive Schwingungen**

*Von Alfred Müller, Stefan Schippers und Ronald Phaneuf*

Reiner Kohlenstoff kommt in der Natur in zwei Modifikationen vor: als Graphit und als Diamant. Dies ist schon lange bekannt. Mitte der 80-er Jahre entdeckten die amerikanischen und britischen Wissenschaftler Robert F. Curl Jr., Sir Harold W. Kroto und Richard E. Smalley eine weitere Form des reinen Kohlenstoffs, in der 60 Kohlenstoffatome zu einem nahezu kugelförmigen Molekül in Form eines Fußballs mit einem Durchmesser von nur 0,7 Nanometern (0,000 000 7 mm) zusammengeschlossen sind. Für die Entdeckung des  $C_{60}$ -Moleküls erhielten Curl, Kroto und Smalley 1996 den Nobelpreis für Chemie. Seither sind viele Eigenschaften des auch als „Buckminsterfulleren“ oder salopp als „Bucky-Ball“ bezeichneten  $C_{60}$ -Moleküls und verwandter Fullerene eingehend untersucht worden. Im  $C_{60}$ -Molekül wurde jetzt von einer internationalen Forschergruppe um Prof. Dr. Alfred Müller und Priv.-Doz. Dr. Stefan Schippers vom Institut für Atom- und Molekülphysik (IAMP) der Justus-Liebig-Universität erstmalig eine weitere kollektive Schwingungsmode experimentell nachgewiesen. Dabei handelt es sich um ein so genanntes Volumenplasmon, das sich mit ultravioletterem Licht einer Energie von ca. 40 eV anregen lässt und bei dem die Ladungswolke aus den 240  $C_{60}$ -Valenzelektronen abwechselnd gestaucht und gestreckt wird.



Der eigentümliche Name dieser Molekülklasse „Buckminster-Fulleren“ geht auf Bauwerke des amerikanischen Architekten Buckminster-Fuller zurück, deren Konstruktionsprinzip dem des  $C_{60}$ -Moleküls ähnelt.

Eine immer wieder aufgeworfene Fragestellung ist, inwieweit die einzelnen Kohlenstoffatome oder deren kollektives Zusammenspiel die physikalischen und chemischen Eigenschaften des  $C_{60}$ -Moleküls bestimmen. Können die 240 Valenzelektronen in der  $C_{60}$ -Molekülhülle wie in einem Atom einzeln angeregt werden oder wie in einem metallischen Festkörper auch in ihrer Gesamtheit? Bereits Anfang der 90-er Jahre wurde beobachtet, dass sich die  $C_{60}$ -Elektronenhülle zu einer derartigen kollektiven Schwingung anregen lässt, wenn  $C_{60}$ -Moleküle mit ultraviolettem Licht einer Energie von 22 eV bestrahlt werden. Dabei schwingt die gesamte Wolke aus den 240 Valenzelektronen gegenüber dem Gerüst aus den 60 Kohlenstoffatomrümpfen hin und her. Diese Schwingungsmoden wird als Oberflächenplasmon bezeichnet.

Oberflächenplasmonen können spektakuläre

Effekte hervorrufen. So erhalten mittelalterliche Kirchenfenster ihre tiefrote Farbe dadurch, dass im Glas eingeschmolzene nanometergroße Goldpartikel durch die Absorption von blauem und gelbem Licht zu Oberflächenplasmon-Schwingungen angeregt werden, während die langwelligere rote Komponente des einfallenden Sonnenlichts von den Goldpartikeln durchgelassen wird.

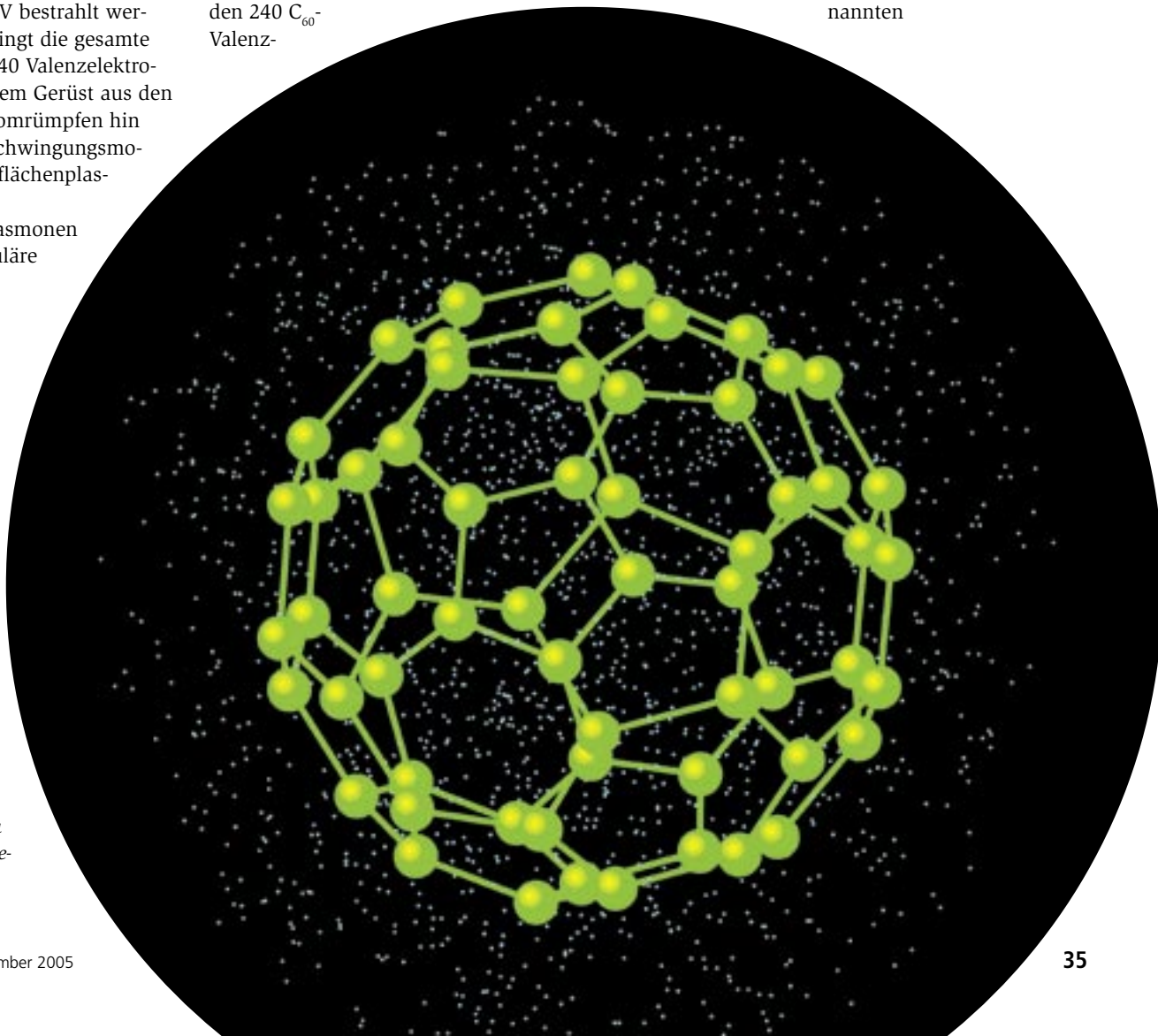
Im  $C_{60}$ -Molekül wurde kürzlich von einer internationalen Forschergruppe am Institut für Atom- und Molekülphysik (IAMP) der Justus-Liebig-Universität erstmalig eine weitere kollektive Schwingungsmoden experimentell nachgewiesen. Dabei handelt es sich um ein Volumenplasmon, das sich mit ultraviolettem Licht einer Energie von etwa 40 eV anregen lässt und bei dem die Ladungswolke aus den 240  $C_{60}$ -Valenz-

elektronen abwechselnd gestaucht und gestreckt wird.

Die Gießener Forscher Prof. Dr. Alfred Müller und Priv.-Doz. Dr. Stefan Schippers führten das Experiment an der „Advanced Light Source“ (ALS) in Berkeley/Kalifornien durch in enger Zusammenarbeit mit dort tätigen Wissenschaftlern sowie mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Ronald Phaneuf, die an der University of Nevada in Reno beheimatet ist. An der ALS herrschen weltweit einmalig günstige Bedingungen für derartige Experimente. Die ALS stellt als Synchrotronstrahlungsquelle einen sehr intensiven Strahl ultravioletten Lichts zur Verfügung, der in einer von Phaneuf und seinen Mitarbeitern konzipierten Apparatur einem Strahl geladener Atome oder Moleküle überlagert wird. Diese werden in einer so genannten

Alfred Müller, Jahrgang 1949, studierte an der Universität Gießen Physik. Nach Promotion (1976) und Habilitation (1980) wurde er zum Fellow am Joint Institute for Laboratory Astrophysics in Boulder/USA ernannt. Von einer Professur in Stuttgart 1995 nach Gießen berufen, führt er mit seiner Arbeitsgruppe am Institut für Atom- und Molekülphysik sowie an auswärtigen Forschungseinrichtungen in Berkeley, Darmstadt, Heidelberg und Stockholm Experimente zur Klärung elementarer Stoßvorgänge in Plasmen durch.

Abb. 1: Modell des neutralen  $C_{60}$ -Moleküls (Buckminster-Fulleren). Die 60 Kohlenstoffatome (grün) sind in der Form eines Fußballs (Bucky-Ball) angeordnet. Die 240 Valenzelektronen (blau) bilden eine Ladungswolke, die bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht als Ganzes zu Schwingungen angeregt werden kann.





Stefan Schippers, Jahrgang 1962, studierte an der Universität Osnabrück Physik. Nach der Promotion 1992 folgten Auslandsaufenthalte an der Universität Groningen in den Niederlanden und am Oak Ridge National Laboratory in den USA. Seit 1996 ist er als Wissenschaftler am Institut für Atom- und Molekülphysik tätig. 2002 habilitierte er sich im Fach Experimentalphysik und 2004 wurde er zum Akademischen Rat ernannt.



Ronald Phaneuf, Jahrgang 1947, studierte Physik an der Universität Windsor in Kanada, wo er 1973 promoviert wurde. Nach zweijährigem Forschungsaufenthalt am Joint Institute for Laboratory Astrophysics in Boulder/USA wurde er 1975 leitender Wissenschaftler am Oak Ridge National Laboratory in den USA. Seit 1992 ist er Professor für Physik und Physikalische Chemie an der University of Nevada in Reno/USA. 2003 war er als Humboldt-Preisträger Gastprofessor im Institut für Atom- und Molekülphysik der Justus-Liebig-Universität Gießen.

EZR-Ionenquelle erzeugt, die am Gießener IAMP entwickelt und gebaut wurde.

Im  $C_{60}$ -Experiment wurden in der Ionenquelle Strahlen einfach positiv geladener  $C_{60}^+$ -Ionen erzeugt und mit dem Strahl ultravioletten Lichts in Wechselwirkung gebracht. Dabei bestand eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass den positiv geladenen  $C_{60}^+$ -Molekülen jeweils ein negativ geladenes Elektron entrisen wurde. Die dabei entstehenden zweifach positiv geladenen  $C_{60}^{2+}$ -Ionen wurden als Signatur für diesen als Photoionisation bezeichneten Prozess nachgewiesen. Auf diese Weise konnte die Photoionisationswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Energie des ultravioletten Lichts bestimmt werden. Die Wahrscheinlichkeit für das Ablösen eines Elektrons ist besonders hoch, wenn ein Plasmon im  $C_{60}$ -Molekülion angeregt wird. In der Messkurve trat daher ein deutliches Maximum auf bei 22 eV, der Anregungsenergie des schon bekannten Oberflächenplasmons. Im ALS-Experiment wurde die Messung nun zu höheren Energien fortgesetzt. Dabei kam es zu einer Überraschung: Bei einer Energie von etwa 40 eV zeichnete sich ein weiteres Maximum ab, das den Experimentatoren zunächst Rätsel aufgab.

Dieses wurde auf unerwartete Weise gelöst, als Müller, Schippers und Phaneuf, der zu der Zeit als Humboldt-Preisträger am Gießener IAMP weilte, die experimentellen Ergebnisse auf einer fachwissenschaftlichen Tagung in Berlin vorstellten. Ebenfalls anwesende theoretische Physiker vom Dresdener Max-Planck-Institut für die Physik komplexer Systeme hatten die Existenz eines zweiten Maximums auf der Basis theoretischer Rechnungen vorhergesagt und dieses als die kollektive Anregung eines Volumenplasmons interpretiert. In Ermangelung einer experimentellen Bestätigung waren diese Resultate jedoch nicht veröffentlicht worden. Die Situation war also so, dass die Experimentatoren einen experimentellen Befund ohne Erklärung hatten und die Theoretiker eine Erklärung besaßen – allerdings ohne Befund.



Abb. 2: Mittelalterliche Nanotechnologie: Die rote Farbe von Kirchenfenstern wird durch die Anregung von Oberflächenplasmonen in eingeschmolzenen Nanopartikeln aus Gold hervorgerufen.

Das glückliche Aufeinandertreffen beider Gruppen führte sofort zu einer fruchtbaren Zusammenarbeit, deren Ergebnisse in der renommierten Fachzeitschrift „Physical Review Letters“ (Band 94, Artikel Nr. 065503, Autoren: S. Scully et al.) veröffentlicht wurden und bereits kurz nach Erscheinen dieser Arbeit weithin Beachtung fanden (siehe z.B. Physics News Update #722 vom 3. März 2005, <http://www.aip.org/pnu/2005/split/722-1.htm>).

Nachzutragen bleibt, dass Volumenplasmonen, bei denen – wie erwähnt – die Elektronenwolke gestaucht und gestreckt wird, in den Goldpartikeln der Kirchenfenster

nicht angeregt werden können. Der entscheidende Unterschied zwischen  $C_{60}$ -Molekülen und Goldpartikeln ist, dass Erstere innen hohl und Letztere innen massiv sind. Nur die spezielle Hohlkugelform der Bucky-Bälle erlaubt, dass sich die 240 Valenzelektronen in exotischere kollektive Schwingungen versetzen lassen. Wie Kirchenglocken klingen sie dabei aber nicht, ihre Schwingungsfrequenzen liegen fast 50 Oktaven über dem Kammer-ton a. •